

Title	<講演3>折り紙でつくる化学コンビナート
Author(s)	森井, 孝
Citation	京都大学 附置研究所・センター シンポジウム：京都からの提言-21世紀の日本を考える(第9回)「社会と科学者」(2015), 9: 41-56
Issue Date	2015-01-21
URL	http://hdl.handle.net/2433/194284
Right	
Type	Presentation
Textversion	publisher

講演 3

折り紙でつくる化学コンビナート

京都大学エネルギー理工学研究所教授 森井 孝



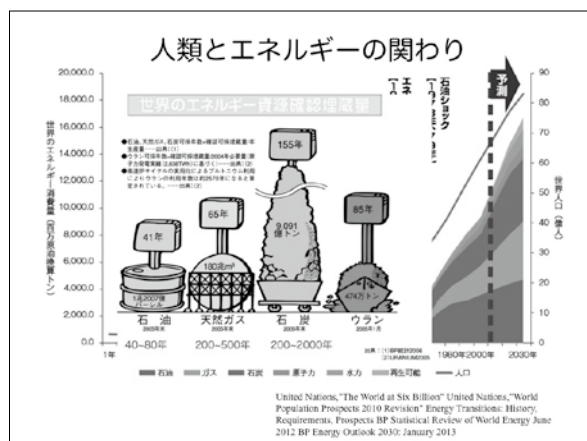
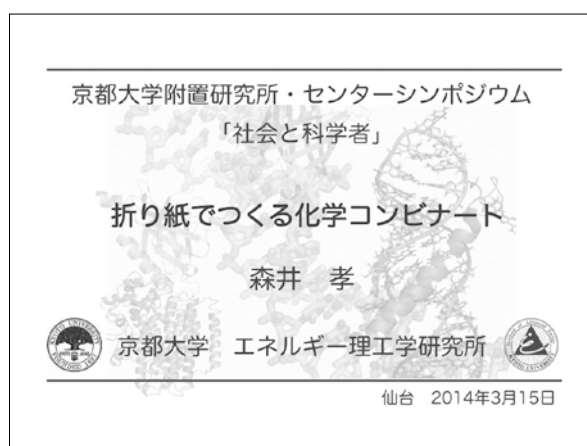
京都大学エネルギー理工学研究所の森井です。ご紹介ありがとうございました。

本日は、この「社会と科学者」というシンポジウムのタイトルのもとに、「折り紙でつくる化学コンビナート」というタイトルでお話をさせていただこうと思います。

関西風に言いますと、ちょっとちょけた名前、タイトルをつけておりますけれども、そんなに込み入った難しい話にならないように気をつけてお話ししたいと思います。特に高校生の皆さんもたくさんおられますので、化学者というものが社会に対して何ができるか、化学者というのは、考え方というものを新しく述べていく、つくっていくということがひとつの役割だと思っています。午前中の山子先生の話にあったような、非常に有用なものをつくったり、新しい方法論をつくったり、でも、そのベースにあるのはやっぱり考え方だと思います。

私はエネルギー理工学研究所というところにおります。まず、エネルギーということを考える、そこに、こういう考え方もあるんじゃないかということを紹介させていただきたいと思っています。

これは、我々人間が使っているエネルギーというものが、大昔からどういうふうになってきたかということが、そのまま関係しているんですけれども、昔は確かに人口も少ない、同時に使うエネルギーも少ないという時代がずっと続いてきたんです。科学の技術的な部分ということを考えると産業革命というものが思い浮かぶと思うんですけれども、この新しい技術というものが出てきたのと同時に、新しい社会形態、そしてエネルギーを使う量も爆発的に伸びてきて

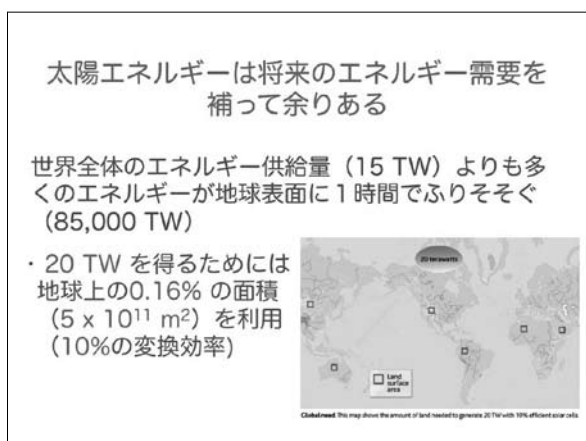


います。

エネルギーの話といいますと、震災以降もいろいろ話題になっていますが、比較的暗い話も出てきます。何がそんなに暗いかといいますと、我々が依存しているエネルギーのもと、石油、天然ガス、石炭そしてウラン。こういうものがあと何年しかもたないという話が出てきます。これはこれくらいの量しかないんですよ、我々の社会はこういうものに依存していて、その量はそんなにない、ということを示すことも科学者の役割の一つです。ただし、その石油でも80年もつ、天然ガスは500年もつ、石炭は2000年もつというふうな話があります。このように、全部未来が限られてしまうような話になってしまいます。ですから、こういうことを考えると、いかにも脅迫されているような非常に暗いイメージがあります。でも、エネルギー問題というのは、決して脅迫されてやるものではないと私は考えています。もっと楽しい夢のある話、そういうものがあるんですよという考え方を示すことができたなら、きょう私がここで話した甲斐があったと考えますので、よろしくお願いします。

いい方の話です。我々はお日さんを持っています。エネルギー需要というものを考えますと、それを補って余りあるぐらい、我々はお日さんからエネルギーを得ています。具体的な数字で考えますと、世界全体でエネルギーが供給されているテラワットというところでもない例が書いてありますが、それよりも多くのエネルギーがわずか1時間で地球表面全体に降り注いでいる。こういうことを考えると、実にたくさんのエネルギーがあると考えられます。太陽エネルギーという一番に思いつくのが太陽電池だと思います。皆さんのお家にもあるかもしれませんし、いろんなところで使われています。これは机上の空論かもしれませんが、今の太陽電池をそのままの効率で使ったとしても、20テラワットという必要な量を得ようと思ったら、この世界地図のうち、これだけの面積に太陽電池パネルを敷けば賄えるというのが計算上では成り立ってくるわけです。

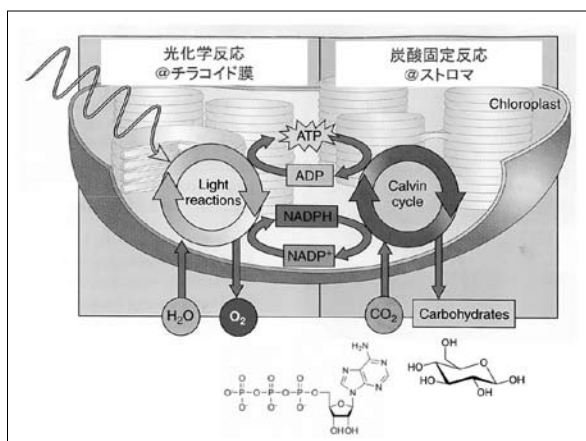
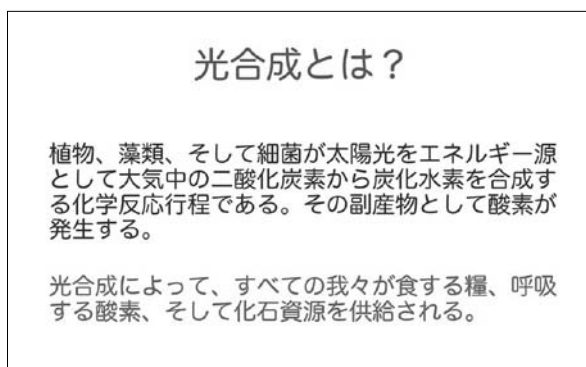
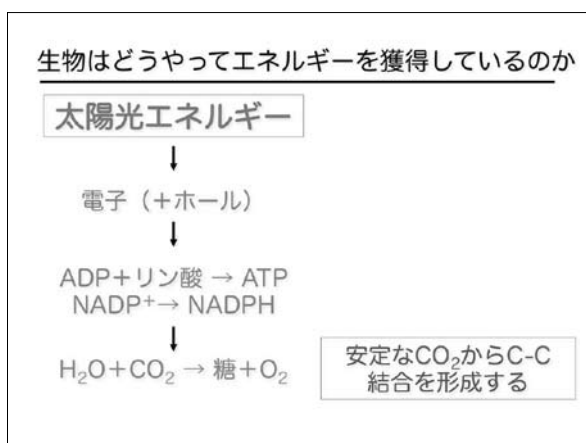
ただし、それを実際にそのまま敷くのは結構大変です。もう一つは、電気をつくったとしても貯めておけないんです。いろんなところにどんどん送っていかなければいけない、そういう問題が出てきます。ですから、太陽エネルギーは非常にたくさんあるんだけど、電気ということだけで考えると、まだ問題が残っているというのが現状です。太陽エネルギーを考えると、植物、光合成ということのを思い浮かべていただけるかもしれません。そこまで戻って考えてみます。太陽光のエネルギーを受け取って何が起きているか。最初に葉っぱが太陽の光を吸います。そこからまず電子ができるんです。この過程は、実は太陽電池と原理的に全く同じです。太陽の光を



吸って電気になっている。現時点で我々が太陽エネルギーを使うとき、電気として使うか熱として使うか、そのうちの一つの段階までは人間は既に到達していると考えてもいいわけです。

ただし、その後植物が何をしているかというと、ATPやNADPHといわれる生物のエネルギーを溜める分子に、化学結合としてエネルギーを溜めるか、電子だめとしてエネルギーを溜めるか、そういう貯蔵法を生物、特に植物はやっているわけなんです。ここからまた幾多の過程を経て、水、これは非常にたくさんある安定なもので、我々は水の惑星に住んでいるようなものですが、それと、炭素の中でも一番安定な形態である二酸化炭素を用いて、我々が食べる物質、そして呼吸する酸素というものがつくられているわけです。すなわち、先ほどの山子先生の話にもありましたけれども、このC-C結合をつくっていくこと、非常に安定な二酸化炭素から炭素と炭素の結合をつくりながら新しい分子をどんどんつくっていくということが、実際に太陽光エネルギーをもとにして植物がやっていることになります。

光合成を考えると、非常に多くのステップがあることがわかります。植物、それから藻類、そして光合成細菌等は、太陽光をエネルギー源として、先ほど出てきた非常に安定な二酸化炭素から炭化水素、それに基づく有機化合物というものを合成する化学反応、多段階の化学反応を行っています。これはいろんな見方がありますけれども、その副産物として酸素が発生している。これが光合成という過程の一つの考え方です。この光合成によって、我々が食べる食料、呼吸に必要な酸素、先ほど、もうすぐなくなってしまうという脅迫観念に襲われると言っていた石油、石炭、天然ガスなどの化石資源、そういうものも全て太古の光合成から供給されているわけです。すなわち、我々は大昔から、そうやって溜まってきた化石資源を非常に短期間で使っている、それはまずいんじゃないでしょうかというのが、最近言われている批評です。



光合成には、太陽光で直接反応する部分、そこで水から酸素ができ、そして化学結合にエネルギーを溜める、電子を溜めるという化学反応過程があります。その後、また化学反応工程がたくさん並んでいって、二酸化炭素をこういう糖に変えていく、エネルギーはATPに変えていく、こういう過程が存在しているわけです。さきほども

生物はCO₂とH₂Oを原料にして、希薄だが豊富な太陽エネルギーを利用して有機物（資源）を合成 = 年間1.7 × 10¹¹トン

合成された資源はCO₂にもどる = 生命現象は膨大な資源を循環的に供給

- ・ 生命現象の提供する資源とエネルギー源を利用
 - ・ 生物の代りに循環性資源とエネルギーを合成
- = 人工の葉 (The Artificial Leaf)

言いましたが、この段階は太陽電池ですでに原理的にはできているわけです。これだけのものを、二酸化炭素と水だけを原料にしながら、お日さんが降り注いだエネルギーで、膨大な量の有機化合物が地球上でつくられています。こういう資源とは、植物や木材や葉っぱ、いろんなものを全部含んでいるんですけど、こういうものはその後どうなるかというと、もう一回CO₂に戻ります。CO₂に戻ったものは、また、植物、藻類、細菌が、また有機物、そして糖、我々のごはんのもとに戻してくれるわけです。

生命現象というものを全体として把握して考えると、この膨大な資源、水と二酸化炭素をもとにしてつくった化合物というものを、循環的に供給しているというのが、我々地球上に住む生物というものが行っていることになってきます。合成されたこういう資源を、その後またCO₂に戻してもまたつくってもらえるわけですから、植物をはじめとする、そういう生命現象が提供する資源とエネルギー源、こういうものを利用していくというのが一つの考え方になってくるわけです。よくカーボンニュートラルといわれるのは、植物などに依存した資源をCO₂に戻しても、また植物などによって有機物に変えてもらえる。そういう循環的な資源を石油や石炭の代わりに使っていきたいという考え方です。

もう一つは、生物、特に植物や藻類がやってくれている、循環性の資源、そしてエネルギーを合成するという過程を人間ができないかという考え方です。これは、近年特にヨーロッパ、アメリカで考えられ始めていますし、1970年代にも人工光合成という名前でもかなり研究が行われました。しかし、それは非常に難しく、結局、表舞台からはおりて細々と研究するという状況に変わっていったんですけども、また近年「新しい人工の葉っぱ」という考え方で見直しが行われています。人工の葉っぱと言ったとき、どんなものを思い浮かべますか？決して葉っぱの形をしているわけではないんです。その中の概念、考え方です。どういうものかということ、光をちゃんと吸ってくれるアンテナ、これは色素なんですけれども、それが太陽光を吸ってくれる。その後、エネルギーが移動していく、1つの反応点から電子が動いていく、その電子がもう一つの反応点に進んでいく、これは連続した化学反応ですけども、こういう形態がとれば、これはそのまま人工光合成、もしくは人工の葉っぱであるということになります。ですから、この化学反応によって何が出来るかは限定されるものではなく、あくまで一つの例として考えると、水から酸素がで

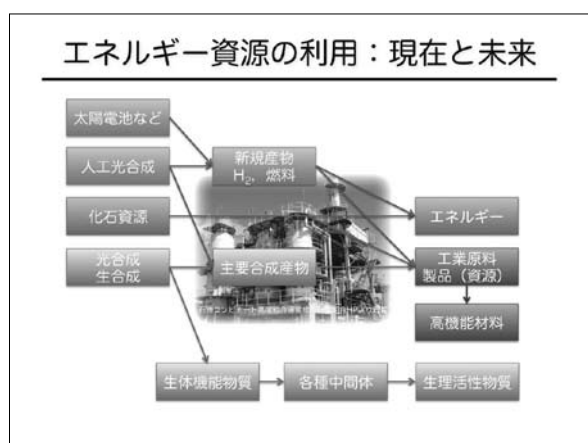
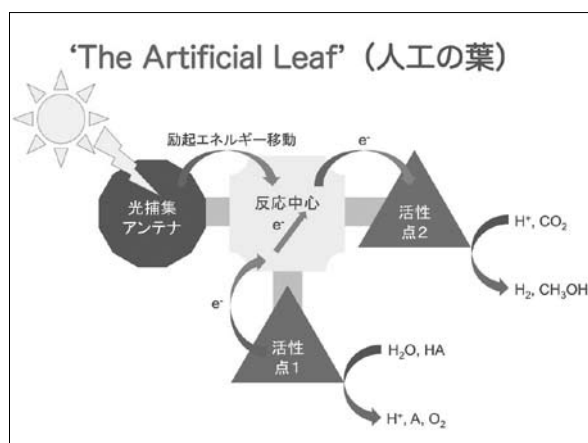
きるという例もありますし、全く別のことも考えられます。二酸化炭素からメタノール、燃料ができるということもあり得ますし、他の物を別の化合物に変える、その過程でエネルギーが溜められるという考え方もあります。

こういう人工の葉っぱというのは、どういものをつかっていったら人工の葉っぱと呼べるかということに関してもそうで

すが、種類はたくさんあります。ですから、自然と同じように酸素を必ず発生させなければいけない、もしくは、将来のために水素を発生させなければいけない、もしくは、必ずグルコース、糖をつくらなければいけない、そういう狭義なものじゃないんです。もちろん、科学的チャレンジとして、何とか二酸化炭素から糖をつくりましょう、何とか水から効率よく酸素を出しましょう、これも、もう一つのアプローチとしてあり得る考え方です。

ただし、全体として考えたとき、いかにうまく太陽のエネルギーというものを使いながら化学反応を進めていくか、それに集約するような考え方が重要になります。こういうことができると、太陽光というものをもとにしながら、いろんな有用な化合物をつくり、太陽エネルギーを電気に変えるだけでなく、ちゃんと貯蔵することができるようになる。ちょうど植物がやっているような有機物に変えて貯蔵して、必要なときに、それを燃料として使うというふうなことも可能になってくるわけです。これはあくまで私は考え方を示しているわけで、実際にそういうプラントが今あるわけではありません。今、我々の社会、実際の本以外に、合成ポリマーなど非常に有用なものがたくさんあります。でも、そのおおもとなっているのは化石資源と呼ばれるものです。数億年かけてできたものを今、精いっぱい短時間で使っているわけです。それをもとにしてガソリンにする、発電したエネルギーを使っていく、我々の生活を支える非常に機能的な高分子材料、高機能材料をつくっていくというのが、我々の社会が現在行っていることです。

最近になってバイオマスを使いましょうと言われはじめています。バイオマスというのは、結局、植物が生産する糖からできた産物です。先ほどのべた太陽光をもとにしてつくられた木や草など、いろんなものがここには含まれており、光合成で出来上がったものと捉えることができます。即ち、植物や糖などのバイオマスから、いろんな合成産物、有機物をつくっていく、それを工業原料に持っ



ていくということです。バイオエタノールを使うという話を聞かれたことがあるかもしれませんが、それはエネルギーに直結するものです。植物の中もしくは微生物の中には、いろんなおもしろい分子がいっぱいあります。それらが、いろんな中間体を経て生理活性物質になっていく。これらを利用するルートが新しく今できようとしている。実は昔から使っていることなんです、発酵なり何なりの生物の力を使いながら燃料をつくっていく、分子をつくっていくということは実際にはやられているわけです。今出てきた人工の葉っぱ、人工光合成ということを考えますと、この太陽光というものをベースに用いながら新しい分子をつくる、その分子から主要合成産物をつくる、水素をつくる、燃料をつくる、電気をつくるということが、ここで行われていく。今実際に行われている部分と、まだ行われていない部分が混ざっています。未来を考えたとき、この赤い部分、これが実用に近づけば近づくほど、我々は非常に膨大なエネルギー、それから膨大な資源というものに手が届くようになっていくと考えられるわけです。

こういうことを考えながら、エネルギー理工学研究所では、いかにして太陽光をうまく使っていくか、革新的とか何とか仰々しい名前がいっぱいついていますが、大学の附置研究所として、今現在使われている太陽電池、それをはるかに超えるような効率で太陽光をうまく使える、そして電子をうまく取り出してくる、そういう材料を使った太陽電池というものをつくっていききたい。もしくは、今人工の葉っぱと言いましたが、新しい燃料、それから有機物をどんどん造っていく、そういうチャレンジをしています。膨大な量が存在すると言ったバイオマスについても、もちろん実際に工業的に使うとなると、輸送等の問題とかいろんな経済的ファクターが入ってくるんですけども、科学的な方法論として新しいものを提供することにチャレンジしています。我々の研究所で考えていますのは、ゼロエミッション、つまり、要らないものは出来る限り排出しない、そういうエネルギーの使い方ができるような基本技術をつくっていききたいと考えて研究をしています。



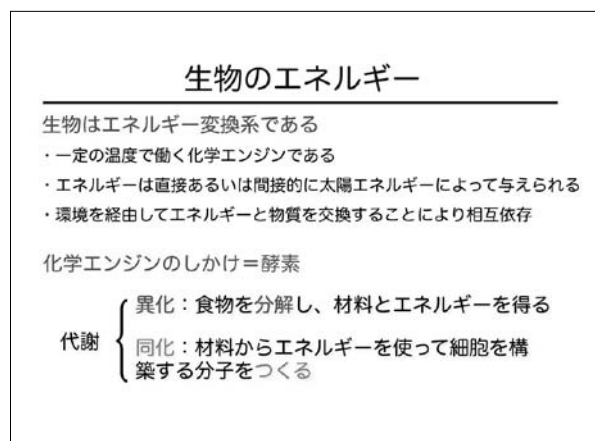
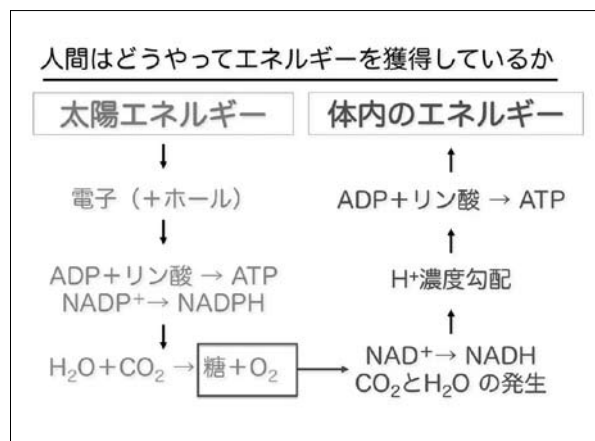
先ほどの、人間はどうやってエネルギーを獲得しているかというところに戻ってお話をさせていただきますが、ここで糖ができています。植物、それから微生物等の光合成反応によって太陽エネルギーは糖と酸素になる。この糖は、今まさに、この私の話の前に皆さんが食べられたものです。今、実際に吸っておられる酸素はこれなんです。その後、またいろんな反応が起こります。ここから先は例です。これは私です。ごはんを食べた後です。ここで呼吸をしながら二酸化炭素を吐いて、水も出していきます。電子というものを、この食べたものから得ます。これはプロトン濃度勾配と、ちょっと専門的なことですが、A

ATPをつくるときのエネルギーの駆動力になっています。私がしゃべるときにこうやって筋肉を動かすとき、このATPと呼ばれる分子を使いながらしゃべっているわけです。すなわち、ATPなり電子をためているNADHという分子、こういうものが今しゃべっているときのエネルギーとなっています。

すなわち、太陽エネルギーからぐるっと回って、そのまま体内のエネルギーとなっている。直接私がお日さんを浴びながらしゃべっているというわけではなく、こういう過程を経ながら、太陽光エネルギーに依存しながら、こうやって皆さんにお話ができているわけです。この電子を得る段階までは人間は、実用的に工業的にできる状態になっているわけです。この後の過程、もしくは、ここから先の過程ができるようになってくると、先ほどの人工の葉っぱというものが、いろんな局面で使えるということになってきます。

もう一回考えてみましょう。生物のエネルギー、これは私のエネルギーでも構いません。生物のエネルギーということを考えたとき、私自身はエネルギー変換系であり、体温という温度で働いている化学エンジンです。化学エンジンで、こうやってしゃべって動いています。先ほども言いましたように、このエネルギーというのは、直接もしくは間接的に太陽光エネルギーによって与えられています。ごはんを食べて、それをもとにして環境を経由して太陽光エネルギー、それを物質として交換しながら使っているというのが実際にやっていることです。このことが、すなわち、エネルギー変換系、もしくは化学エンジンであると私がお話していることです。

では、この化学エンジンというものの仕掛けは何でしょう。先ほど、こういうものからATPができますとか、いろんなことを説明しましたがけれども、それをやっているのが酵素と呼ばれる分子です。先ほどの山子先生の話の中にも、常温常圧でアンモニアを固定化する酵素が出てきましたね。そのような酵素を我々は体内に実にたくさん持っています。その中で、今食べた食物を分解して、材料とエネルギーを得ています。今、皆さんはまさに座りながらそれをやっているわけです。材料から、今度はエネルギーを使って細胞をつくる分子をつくっていく。つまり、分解してエネルギーを取るところと、それからつくる



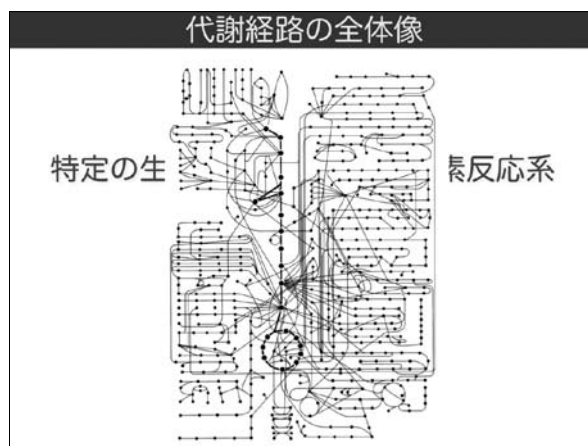
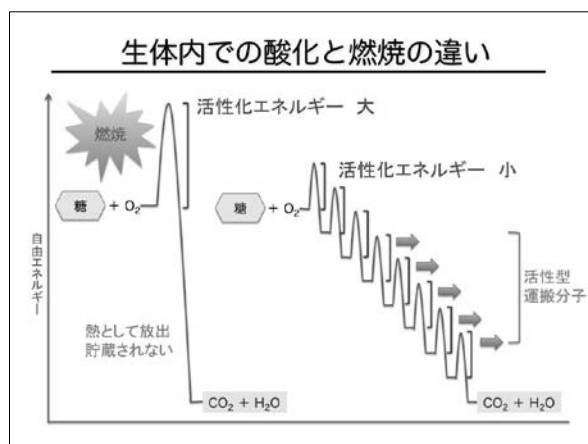
ほう、この両方ともを担っているのが、この酵素という分子です。

酵素が行う化学反応は、一体普通の化学反応と何が違うんだということを考えると、よくこのような図が使われます。糖と酸素、これを燃やすと、 CO_2 と水が出ます。我々が、セルロース、木を燃やす、紙を燃やす、こういうときには、糖がずうっとつながった分子がセルロース

ですから、紙を燃やすことによって大きなエネルギーを得つつ、一気に二酸化炭素と水を出していきます。私は、紙は食べられませんけれども、その紙の構成要素である糖をごはんとして食べています。それを酸素を使いながら、少しずついろんなものに変えていきながら、最終的には二酸化炭素と水として出すということをしています。

すなわち、化学反応を私の体温の中で起こさなければいけない、これが大きな違いになってきますね。起きる反応をたくさん組み合わせていって、いろんな分子をつくっていくということを、我々は知らずとやっているわけです。ずうっとつながっていく今のような階段状のものは代謝経路等と呼ばれているんですけれども、それは特定の化合物を得るための一連の酵素反応であるというふうに考えてもらったらいいです。これは代謝マップといって、大学で生化学で勉強するとういうものが出てくるんですけれども、もちろん皆様にこれを見てもらうときに、それぞれ何かなんて説明する気はありません。ただし、皆さんの体の中で、これだけの反応が起こっているわけです。この一つ一つの点というのは全部違う有機分子です。この有機分子が、この点からこの点というように変わっていく過程には、すべて酵素と呼ばれているものが関与しています。これだけの複雑な反応が細胞の中で寄り道せずに行われているから、私がここでしゃべれているわけなんです。

先ほど、太陽光から電子を取り出すところまでは人間もできていますと言いました。その後、生物がやっているような反応をしようと思ったとき、一体どうやったらこれだけ複雑なことが起きるんだろうということが疑問になってくるわけです。科学者の常として、常に「何でだろう」というところ、ここにどんどんたどり着いていって、何かわかれば、じゃあ「何で」というのが、ずっと続いていくということになっています。では、その中の仕組みは、どうなっているか、ちょっと漫画的に紹介させていただきます。

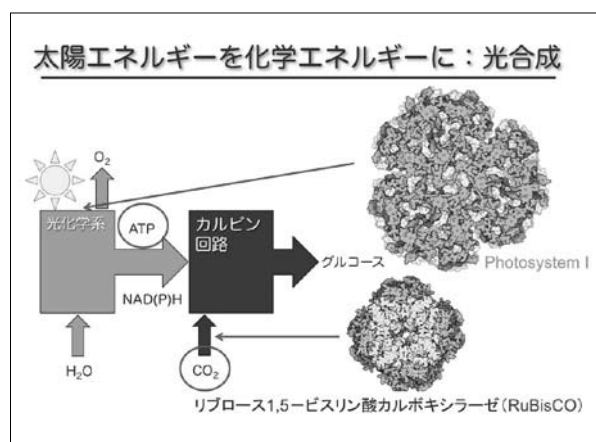
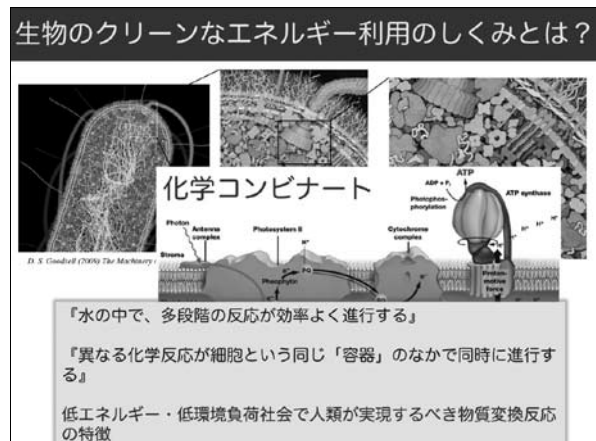


これは光合成細菌ではなくて大腸菌の絵ですけれども、この中に何が入っているか、カラーで拡大した部分というは、こういうふうになっています。いろんな分子が存在し、糖鎖が存在していたり、ここには大腸菌が泳ぐためのべん毛というのが存在しています。タンパク質、これも高分子ですね、もしくは核酸、遺伝子というものがこうやって密集して存在しています。このままだと何かドングリのようにドーンと入っているだけのものに見えるかもしれませんが、それを拡大してみると、こういう分子がいろいろと存在しているというのがわかってくる。こういう分子が、ここに見られるような形、ある形で並んでいる状態、これを化学コンビナートというふうに私は呼んでいます。なぜかという、この場合は光合成なんですけれども、光が当たった後、電子が取り出され、それがずっと伝わって行ってATPが合成されるという一連の流れ作業のような化学反応が、ここで行われているということなんです。

ここで起こっている反応の特徴をまとめますと、水の中で多段階の反応が効率よく進行する、同じ細胞という入れ物の中で同時に、いろんな反応が混ざり合わずに存在していることがあげられます。こういう反応は、エネルギーをあまり使わず、環境負荷も低いので、ゼロエミッションの社会では、人類がチャレンジして実現すべき物質変換反応じゃないかなというのが我々が考えていることです。

光合成で何が起きているかをもういちど考えてみますと、先ほどの繰り返しになりますけれども、最初に、太陽光から電子が得られて、その後ATP、それから電子種の貯蔵分子が出来上がる。その後、酵素の一連の反応でCO₂がグルコースに変わっていく反応が行われています。その中で使われるごくごく一部の酵素をここに絵で描いてますけれども、こういう酵素というものが、この反応を行ってるわけです。これは光を受ける部分です。そしてCO₂を実際にグルコースに変えるときの第1段階、そのために存在しているのが、このリブローズ 1,5 - ビスリン酸カルボキシラーゼ、何か呪文のようですが、ルビスコと呼んでいる酵素です。

この第1段階の反応を行う上で、このルビスコという酵素は、地上で一番多い酵素といわれている、あんまり効率のよくない酵素なんですけれども、どうやって働いて

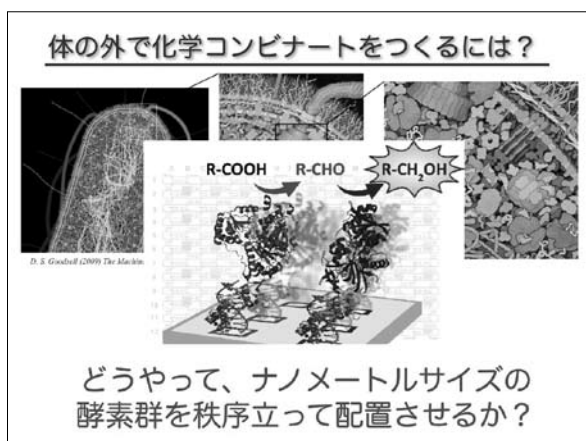
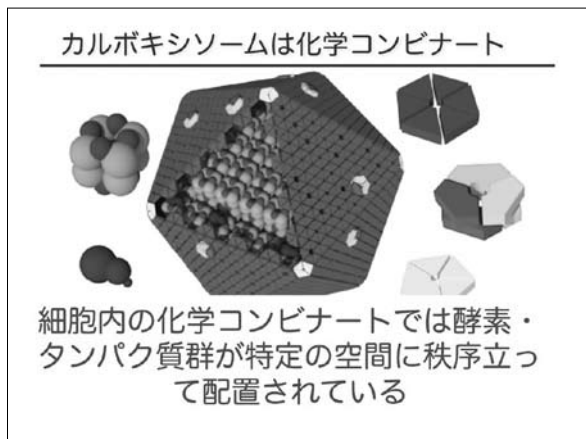
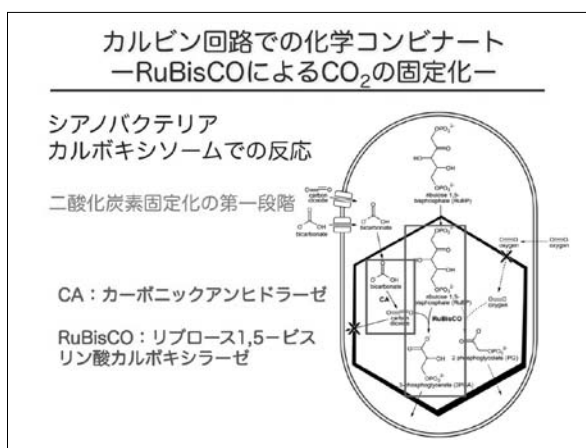


いるんでしょねということ、いろんな方が調べています。こういうことを調べられているということに手が届くのが、科学の世界の非常にいいところで、それを我々学びながら次のことが考えられるというのが科学の世界の非常に楽しいところになってくるわけですね。

つまり、このカーボニックアンハイドラーゼという酵素と、それからルビスコという酵素、この酵素二つが共同しながら、二酸化炭素を、まず、グルコースに変えるための第1段階の反応をやっているということがわかっています。この反応を、実際にシアノバクテリアの中で、どういうところでやっているんだろうか。電子顕微鏡で見ると、この黒い場所でどうもやっているみたいです。その中に何か粒があります。この粒は何だろうか、この粒を見ると、いろんな酵素、先ほど出てきたルビスコという酵素、それからカーボニックアンハイドラーゼという酵素、そういうものが整然と、こういうふうに並んでいる。あるパッケージをつくっている状態で化学反応を効率よくやっているということになります。

生化学の歴史で、酵素というものは、いつも興味の対象でありました。だから、1個1個の酵素は非常によく研究されています。ただし、先ほど、いろんなことが細胞の中で起こっているんですよとお話したように、実際の細胞の中では、幾つかの酵素というのは協力しながら働いている、これが細胞の中で起こっていることと、細胞の外で調べたこととの大きな違いなんですね。だから、細胞内のこういう化学コンビナートの中では、酵素、それからタンパクが特定の空間にちゃんと配置されている、これが重要なことになってきます。

じゃ、さっきの問題に戻って、それを細胞の外でつくるにはどうしたらいいんでしょう。体の外で化学コンビナート、こういうものをつくっていくために、こういう分子を全部こうやって並べていかなければいけない。例えば、こういうふうに酵素を並



べていくと、1段階、2段階と反応が進み、カルボン酸からアルコールができる反応が進行していくわけです。

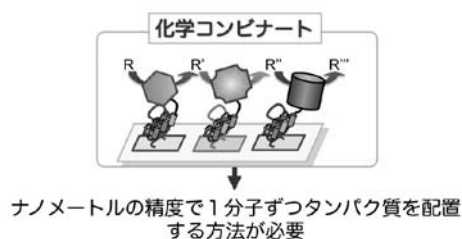
ただし、先ほどの山子先生のお話に出てきましたが、これらはすごく小さいんです。だから、つまんで、こことここに置くというわけにはいきません。どのくらいの距離に置いたらいいか、これもよくわかりません。ただし、近いところに置いたらおそろくいいんだろうなという想像はつきます。一体どうやったら、こんなことができるんだろう。すなわち、化学コンビナートを分子でつくっていかうと思ったときには、ナノメートルの精度、実際に手で置けない精度で、こういうものを1分子ずつ配置していくということが必要になってきます。残念ながら、そういう方法は、これまでなかったんです。

そこで、ちょっと考え方を考えてみましょう。なぜこんなものが出てきたか。今日のタイトルにもなっていますが、「折り紙」。皆さんご存じだと思います。こういう平面の紙というものがツルにもなりますし、ヘビにもなりますし、もしくは、こういう穴ぼこの開いた、こういうお皿にもなります。つまり、いろんな形のものがつくっていけるというのが、この折り紙というものの特徴なわけです。

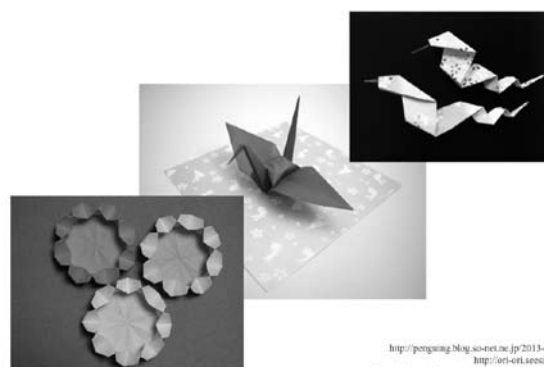
こういうものに発想を得たのかどうかわかりませんが、紙の代わりにDNAを使う。このDNAというものは我々の遺伝子ですね。この遺伝子の一番の特徴は、ある並びで、この高分子ができると、必ずそのお相手というものが決まってくることにあります。1本の鎖があると、それに相補的と呼

んでいるんですけども、アデニンとチミン、グアニンとシトシンという水素結合をつくるような並びをつくって、必ず2本の鎖をつくっていくという特徴があります。だからこそ我々の遺伝情報というのは保存されているんです。このDNAを使って折り紙を折ってやろうという面白いことを、カリフォルニアのロスモンドさんという人が考えました。D

ナノサイズの鋳型にタンパク質を1分子ずつ配置する

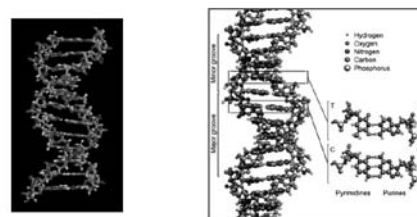


オリガミ



遺伝子 DNA

生物の遺伝情報を担う分子



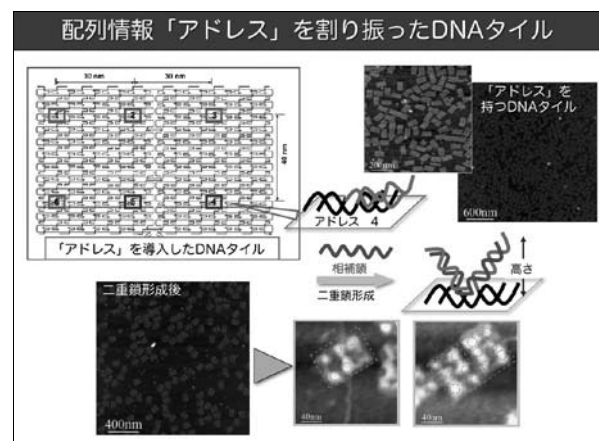
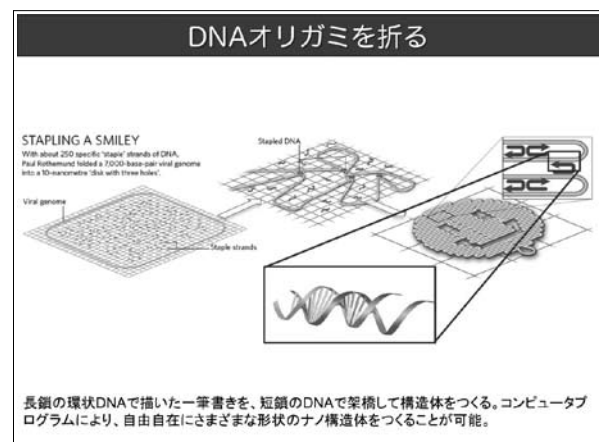
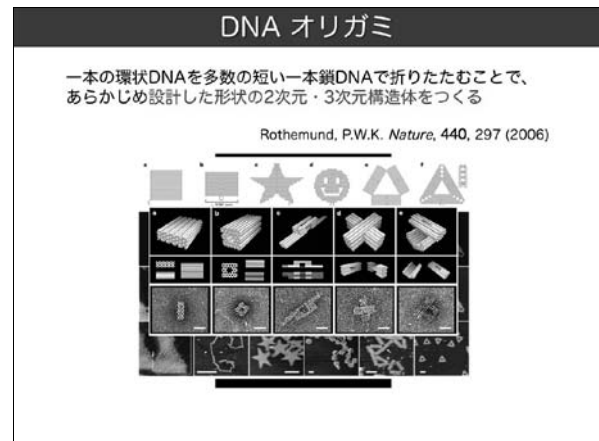
相補的な塩基(A=T, G≡C)間での水素結合を介して二重らせん構造をとる

NA折り紙というタイトルです。

DNAを使って、こういうお布団もできる、星もできる、スマイルマークもできる、いろんな構造をつくることができる。実際に目では見えませんから、原子間力顕微鏡という特殊な非常に小さいものまで形を判別できる測定法を使って見る事が出来ます。実際に、このロスモンドさんの方法を使うと、思った形をそのままつくれる。2次元だけでなく、3次元の筒、それから、いろんな穴の開いたもの、いろんなものがつくれるという方法を彼は開発してくれたわけです。

これをどうやって折っているかという、こういう1本のDNAを使います。これ自身に何が書いてあるか、即ちさっきのA・T・G・Cどう並んでいるかというのは全部わかってます。それを、こういうスマイルマークに、コンピューター上なんですけれども、折ってしまいます。折った後、こういうホッチキスのような短いDNAをたくさん、こうやって入れてやる。そうすると、このそれぞれの部分は、先ほどの遺伝子が保存されている状態と同じで、二本鎖をつかって非常に安定な結合をつくれます。こういう仕掛けがあるから、自分で思った形というものが、そのままつくっていくことができるようになっていきます。

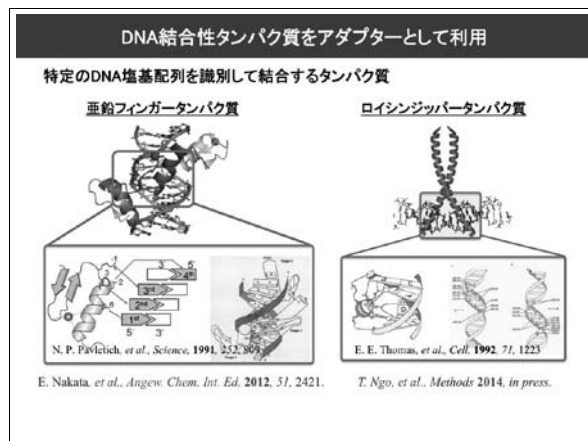
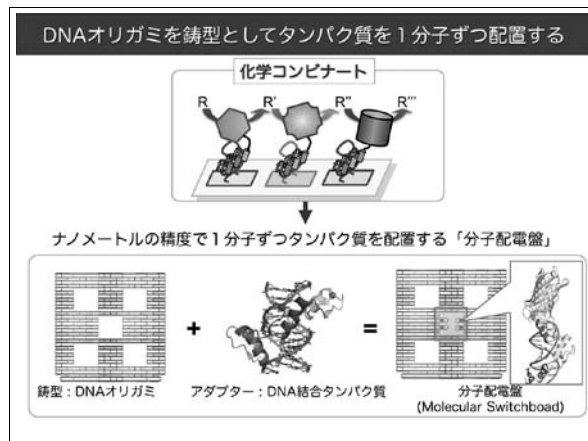
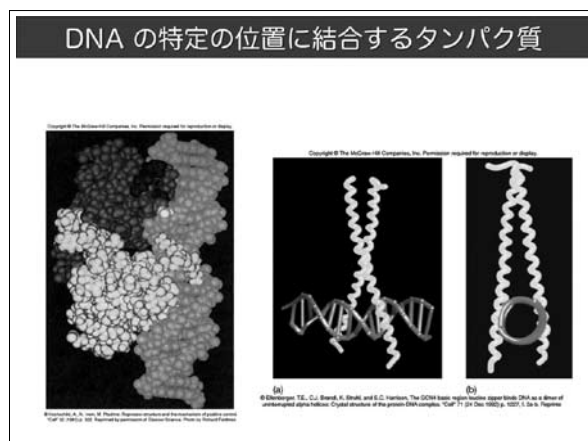
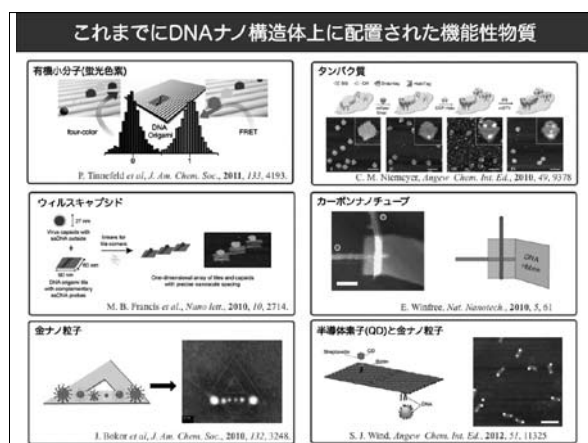
こういうことができると何が出来るか。この大きさ、100ナノメートルという非常に小さい中に、自分で特定の位置に番地をつくったりすることができるんです。ここにあるDNAをこうやっておいておくと、それに結合するもう一方のDNAは必ずそこに結合する。つまりこの場所の上で、自由自在にこのDNAを置いていくことができる。先ほど、こんなことできないんじゃないかと言っていた、ナノメートルサイズの精度で目印をつけるということが出来るようになるわけです。実際、この方法を使って色素を並べたり、金ナノ粒子を並べたり、カーボンナノチューブを並べたり、いろんなことを世界中の人々がやっています。



でも、このDNAオリガミの上に酵素を並べてやりたいと考えたとき、酵素は、タンパク質、DNAは核酸、それぞれ違う種類の分子なんですね。でも、我々の体の中には非常にいいものがある、DNAの決まった場所に結合してくれるタンパク質が存在しています。こういうものを使うと、DNAオリガミの特定の場所に結合するタンパク質、即ち、運び屋さんができるようになってくるわけです。こういう化学コンビナートをつくりたいと思ったとき、ここに番地をつくってやったあと、今の運び屋が酵素を持っていってくれる、それによって特定の場所に、タンパク質を置くということが可能になってきます。

それでは、我々の研究を、ここからちょっと紹介します。ある特定の場所に結合するタンパク質、これにはいろんな種類のものがあります。そういうものを使ってこのDNA折り紙の中の特定の場所に酵素を運ぶ。これはDNAオリガミですが、こういう5つ穴の開いた分子というのは、そのまま作れるんです。ある特定の場所に結合するタンパク質をうまく使ってやると、この場所に結合する。わかるかどうかわかりませんが、ちょっとぼつぼつと白い点が見えるでしょう。ちょうどこの真ん中に番地をつけてやるとそこに結合するということになります。

生物は、同じものが二つくっついた酵素を使っています。酵素を並べたいとき、そういうものにもやっぱり運び屋が必要です。そういうときには、こういう二つの分子からなる運び屋さんというものを使ってやればいい。この運び屋さんは、それぞれ、

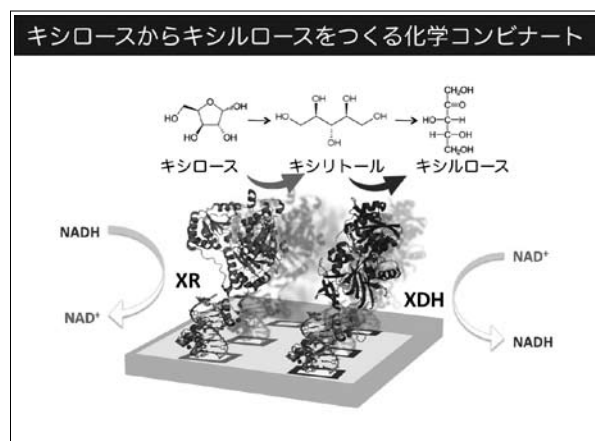
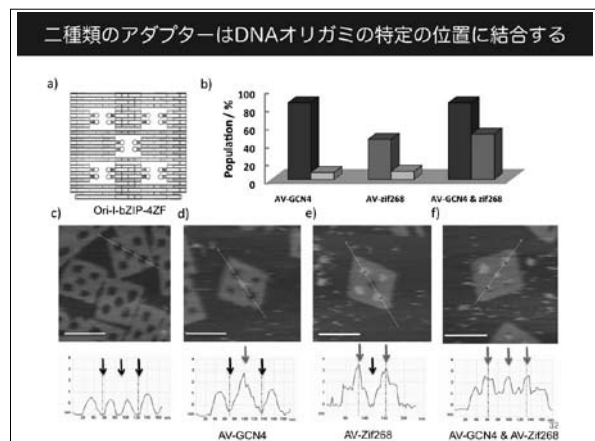
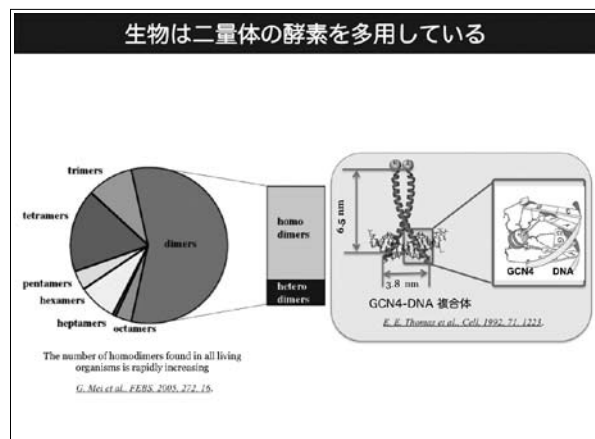
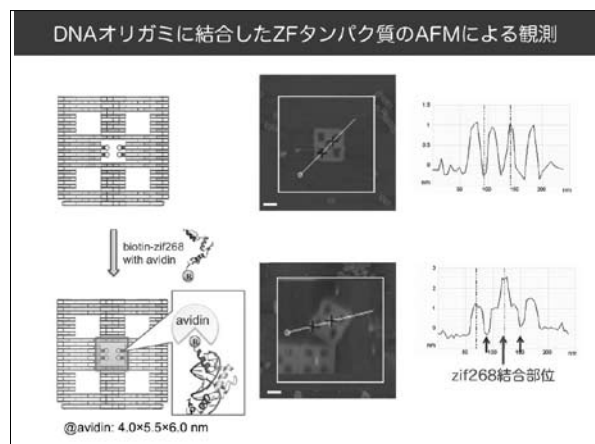


こうやって狙ったところにちゃんと結合してくれれます。もともと生物が細胞の中で使っているものを使っていますから、狙ったところにちゃんと結合してくれるわけです。これで狙ったところに、タンパク質がちゃんと運んでもらえるということがわかりました。

ここで我々一つチャレンジをしてみました。これはキシロースという糖の一種です。そこからキシロースという、また別の糖の一種をそのままつくってみましょうという、2段階の反応です。つまり、キシロース、それをキシリトール、これはガムなんかにも入ってますので、ご存じの方がいるかもしれませんが、それをキシロースというふうに変えていく、こういう反応が、ちゃんと段階的に進むんだろうかと考えました。

まず、キシロースをキシリトールに変えてくれる酵素に運び屋のたんぱくをつけます。もう一つ、キシリトールをキシロースに変える酵素にも運び屋をつけてやります。こちらの運び屋さんにはここに、こちらの運び屋さんにはそこに運んでくれるというように番地をつけてDNA折り紙を設計した後、実際に、これらの運び屋がついた酵素を混ぜてやると、確かに、設計した場所に酵素が結合していることが、このAFMの画像からわかります。

自分で狙ったような10ナノメートルという間隔のもとに、これらの二つの酵素を並べることができるかということが、この方法で確かめることができます。実際に、ここではそれらが並んでいることがわかります。



じゃあ、並べた上での反応というのは、どうなるんでしょう。ちょっとややこしいことも書いてあるかもしれませんが、それは忘れてください。

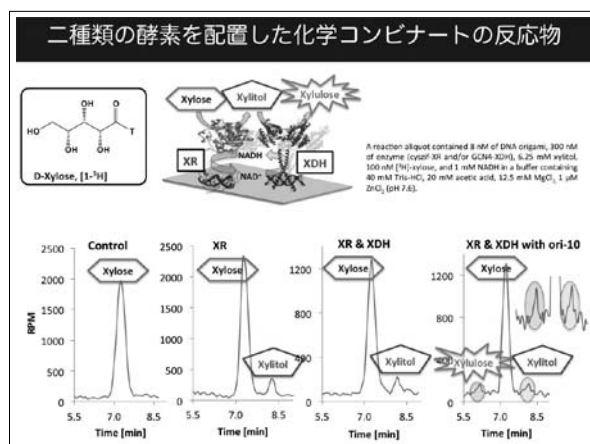
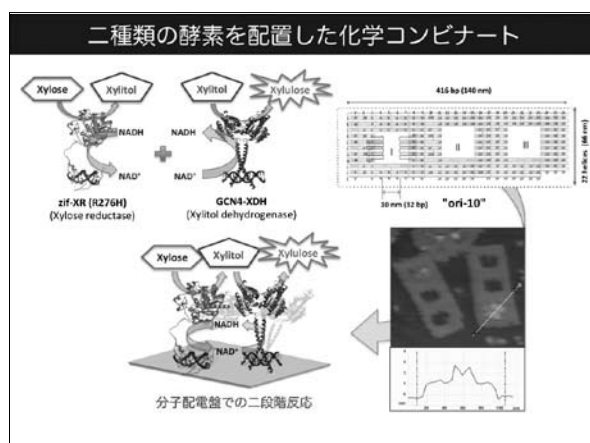
これは反応を分析している様子です。まず、キシロースだけを見ると、こういうところに見えてきます。キシロースをキシリトールに変える酵素を使うと、確かにキシリトールができます。でも、これは水の中でそのままキシロースと酵素を混ぜているだけです。その次に、2種類の酵素、キシロースをキシリトールに変える酵素と、キシリトールをキシロースに変える酵素を水の中へそのまま混ぜても、残念ながらキシロースはできません。水の中では酵素は自由に動いてますから、なかなか次の反応というのは起きないのかもしれませんが。そこにこのDNA折り紙でつくった鋳型を入れて、ちょうど10ナノメートル離れるように二つの酵素を置いてやると、今度はキシロースができてくる。

こういうふうに酵素を並べていくと、先ほど山のようにあった点と線のチャート、あの中の一部が非常に効率よく進行するシステムができたのではないかなと我々は考えています。

こういう一つ一つの分子は、これまでの科学の世界で、その機能、大きさ、特質、構造に至るまで、ものすごく深い研究が過去にされてきています。こういう過去の素晴らしい発見というものを土台としながら次のステップを考えていくことができる。これが科学の非常にいいところだと私は思っています。

こういうふうに並んでいる状態、単にごった混ぜになってないんじゃないかという状態の性質をどんどん明らかにしていく。そういうことをもとにすると、先ほど出てきた、電子をもらった後、その電子を使って作った分子として貯蔵する装置をつくっていく上での、非常に可能性の高い方法に結びつくのではないかと考えられるわけです。

先ほどまでお話ししたように、私がこうやってしゃべっている間でもそうなんですけれども、水の中で非常にたくさんの反応が進んでいます。それが段階的に進んでいます。そして同時に並行して進んでいます。いろんなものが混ざり合わずに、ちゃんと反応している、そういう恐るべきことを我々生物はやっているわけなんです。




それは、どういうことによって可能になっているか。一つの理由は、酵素がうまく並んでいるからではないかと考えられるわけです。ですから、それを実際に細胞の外で、つまり社会で使えるための第一歩をやらうと思ったら、ナノメートルの精度で酵素を並べていく。すなわち、化学コンビナートを分子でつくっていくということで、電子をいかにうまく使うかの、最初の知見になっていくだろうと考えられるわけです。

このように、科学というのは、「何でだろう」というところからはじまり、まだ誰も成功してないようなことにもチャレンジできる非常に面白い学問の領域だと思っています。それと同時に、どういうことが考えられるのか、エネルギーとはどういうものなんだろうなど、いろんな科学者がいて、いろんな側面から、いろんな発言ができるものだと思います。ぜひとも、そういうことをよく考えてみて、自分がそういう世界に入りたいという高校生の方がおられましたら、ぜひそういう仲間になっていただきたいと思っています。

どうもご清聴ありがとうございました。

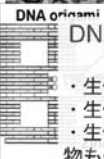
まとめ



DNA origami

生体内の化学コンビナートの特徴

- ・水の中で、多段階の反応が効率よく進行する
- ・異なる化学反応が細胞という同じ「容器」のなかで同時に進行する
- ・生体内の化学コンビナートでは酵素・タンパク質群が秩序立って配置されている



Functional protein

DNAオリガミを使うと、ナノメートルの精度でタンパク質を一分子ずつ配置できる

- ・生体内化学コンビナートの再現
- ・生体内に存在しない分子コンビナート
- ・生体分子だけでなく金属粒子、有機小分子、無機化合物も一分子ずつ配置することができる

Morii Lab

教員・スタッフ
森井 孝 教授
中田栄司 講師
仲野 嗣 助教

博士課程学生
Chiara Annoni (D3, Milano Univ)
Ngo Anh Tien (D2)
田村友樹 (D1)

修士課程学生
馬場ゆかり (M2)
Dinh Thi Thu Huyen (M2)
佐々木 謙太 (M1)
戸田泉人 (M1)
吉村花雄 (M1)





共同研究者
森 泰生 教授
(京都大学工学研究科)
杉山 弘 教授
(京都大学理学研究科)

研究費
科研費
JST CREST

